極細線の熱分解による被覆除去とその接続装置の開発*

川 名 武^{*1}, 小 島 東 作^{*2}, 倉 橋 恭 子^{*2}Removal of Insulation of Very Fine Wires by Thermal Decomposition
and Development of Its Bonding Equipment

Takeshi KAWANA, Toosaku KOJIMA and Kyoko KURAHASHI

The automated bonding technique for very fine insulated wires was required to keep pace with multipin semiconductors or high-density circuit boards. We obtained the relationship between the temperature and the time for thermal decomposition of the insulation of wires using Ozawa's method of analyzing thermogravimetric data, and found that it gives essentially the appropriate temperature. Applying this result, we developed bonding equipment for semiconductors.

Key Words: Assembly, Industrial Machine, Thermophysical Property, Thermal Decomposition, Thermogravimetry, Wire Bonding, Insulated Wire

1. 緒 言

回路基板の高密度実装化あるいは半導体装置の高機能に伴う入出力端子数の増大に対応して、芯線径20~100 μm 程度の絶縁被覆付き細線（以下、被覆細線という）による自動接続技術が要求されている。半導体装置の場合では、ICチップ上の電極とリードフレーム上の端子は従来金またはアルミニウムのはだか線で接続されていたものを、図1に示すように被覆細線で接続するものである。ゲートアレイなど高機能LSIでは入出力端子数が大となって電極ピッチが狭小化し、隣り合う接続線の接触が問題となってきたからである。

被覆細線での接続を実現するためには、接続に先立って接続部分の被覆を除去しておくこと、ボールボンディングにおけるボール形成時に、被覆の溶け上りを防止することが必要である。ここで、被覆の除去には熱分解による方法が適当であること、被覆の溶け上りも熱分解であることから、1 ms 以下から 100 ms 程度の極めて短い時間内の材料の熱分解特性を明らかに

することが必須である。

本論文はこれに対し、被覆材の熱重量分析（Thermogravimetry, TG）の結果から、Ozawaの方法⁽¹⁾により定数を求めた熱分解の反応速度式より、材料の温度と除去あるいは溶け上りの時間との関係を求め、これが分析条件にない短時間あるいは高温で十分実用的であることを明らかにした。従来、熱重量分析による高分子材料の熱分解特性について種々の検討がなされているが^{(2)~(4)}、その結果は分析条件の範囲内で利用されるべきであるとされ、かつ、短時間での熱分解を対象にしたものはない。また、ボール形成時の被覆線の内温度分布に関しては、さきにシミュレーションにより求めている⁽⁵⁾。

図1 被覆線によるボンディング

* 原稿受付 平成2年1月16日。

^{*1} 正員、日立製作所生産技術研究所（〒244 横浜市戸塚区吉田町292）。^{*2} 日立製作所生産技術研究所。

さらに本論文は、以上を総合して開発した半導体向けの被覆線接続装置について述べる。いわゆるウエッジボンディングによるものの実用例はあるが⁽⁶⁾、半導体で主流を占めるボールボンディングでは開発例はない。

2. 被覆材の熱分解特性

2.1 Ozawaの方法による反応速度式の決定

Ozawaの方法は、数種の昇温速度で求めたTG曲線の同一重量減少量を示す絶対温度の逆数と昇温速度の対数が作る直線の勾配から、下記反応速度式の活性化エネルギー(ΔE)等を求めるものである。

$$-\frac{dW}{dt} = A \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \cdot g(W)$$

W : 反応物の残存重量

t : 時間 s A : 定数

T : 絶対温度 K R : 気体定数

ΔE : 活性化エネルギー Kcal/mol

$g(W)$: 反応次数により定まる W の関数

(1) 熱重量分析結果

対象被覆線: ポリウレタン被覆金線

ポリビニールホルマール被覆金線

線 径: 芯線径 25 μm , 被覆厚さ 1 μm

昇温速度: 5, 10, 15, 20°C/min

雰囲気: 空气中 (200 ml/min)

使用装置: セイコー電子 SSC-5000

TG/DTA 300

ポリウレタンの分析結果の例を図2に示す。

(2) ΔE (活性化エネルギー Kcal/mol)

横軸に $1000/T$ (T : 絶対温度), 縦軸に $\log a$ (a : 昇温速度) にとり, TG 曲線の重量減少量の変化 10% ほどのデータをプロットしたものを図3, 4に示す。図の回帰直線は, 最小自乗法により求めたものである。

図2 熱重量分析の例 (ポリウレタン)

Ozawaによれば, 回帰直線のこう配を K , 直線上の2点を $(1000/T_1, \log a_1)$, $(1000/T_2, \log a_2)$ とすれば, 次式が成立する。

$$K = \frac{\log a_2 - \log a_1}{1000\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} = -0.4567 \times 10^3 \frac{\Delta E}{R}$$

これにより残存量(W)10%ごとに求めた ΔE の値を表1に示す。重量(あるいは温度)の変化に対応する活性化エネルギーはナイロン6の場合大きな変化はないとの報告があり⁽¹⁾, テフロン(PFA)についても筆者が同様の結果を得ているが, ここに報告するポリウレタン, ポリビニールホルマールでは大きな変化がみられる。

ここで, この報告が目的とするのは分析温度より高温領域の特性であるので, 以後の解析には, 平均値を用いることにする。

(3) $A, g(W)$

手順は省略するが次のように求められる。

$\log A$: 13.0 (ポリウレタン被覆金線)

14.1 (ポリビニールホルマール被覆金線)

$g(W)$ は, いずれも W (残存重量) である。

2.2 加熱温度と除去に要する時間の関係 前項により求めた反応速度式を用いて被覆を一定温度

図3 ポリウレタンの $\log a \sim 1000/T$ 線図

図4 ポリビニールホルマールの $\log a \sim 1000/T$ 線図

($\theta^{\circ}\text{C}$) に加熱した場合に、被覆の除去に要する時間(t_0)を次のように求めることができる。これを用いて、除去手段の選択およびボール形成時の被覆の損傷の推定を行うことができる。

$$-\frac{dW}{dt} = A \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \cdot W \text{ より}$$

$$-\frac{dW}{W} = A \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \cdot dt$$

W の初期値を W_0 (100%) として積分すれば、

$$t_0 = \frac{1}{A \exp\left(-\frac{\Delta E}{R(\theta+273)}\right)} \ln \frac{W_0}{W}$$

これに、先に求めた値を代入し、残存重量(W)が5, 50, 90%の場合の温度と時間の関係をポリウレタンについては図5、ポリビニールホルマールについては図6に示す。

3. 被覆の除去実験

3・1 熱風による除去 最高温度500~800 $^{\circ}\text{C}$ の熱風を図7に示す角形に成形したノズル先端から吹き出して被覆を除去する実験を行った。図8は熱風の温度分布とこれにより被覆を除去した場合の除去範囲であって、100 msの加熱で被覆の除去できる熱風温度は580 $^{\circ}\text{C}$ 、図示は省略したが、200 msでは540 $^{\circ}\text{C}$ である。熱風温度は、熱電対に熱風を吹きつけその出力が定常的な状態の値であって熱風自体の温度とみなしうる。しかし、これを被覆線に吹き付けた場合の被覆の温度は測定が困難である。そこで、一定温度の熱風を被覆線に吹き付けた場合の被覆の温度を次の条件でシミュレーションにより求めた。

対象被覆線：ポリウレタン被覆金線

表1 活性化エネルギー(ΔE : K cal/mol)

W(%)	Poly-urethan	Poly-vinylformal
90	60.0	—
80	31.2	—
70	30.0	44.8
60	28.0	35.0
50	16.5	42.3
40	23.2	80.8
30	53.5	76.1
20	31.5	31.2
10	37.3	37.6
0	39.4	28.6
Mean	35.2	47.1

線 径：芯線径 25 μm 、被覆厚さ 1 μm

熱伝達率： 3.90×10^3 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

図9はその結果であって、被覆厚みの中央(被覆線の表面から深さ0.5 μm の点)の温度である。この値と表面および芯線と接触している点の差異は、このシミュレーションの範囲では数 $^{\circ}\text{C}$ 以内であり、特に高い温度になるほどその差は小さくなる。

熱風の温度が580 $^{\circ}\text{C}$ および540 $^{\circ}\text{C}$ のときの10 msごとの被覆温度のシミュレーション値により、2・2で

図5 ポリウレタン被覆を除去するに要する時間

図6 ポリビニールホルマール被覆を除去するに要する時間

図7 熱風ヒーターのノズル

求めた式により被覆の減少量を求め、その累積を示したのが図 10 である。熱風の温度が 580°C の場合、100 ms 後の残存量は 0.20 % であり、540°C の場合 200 ms では 0.19 % となる。

2・2 で求めた式は指数曲線であるから残存量は 0 にならず、残存量が 0.2 % 程度であれば、除去されたと判断してよいであろう。

以上のように、被覆線に与えるエネルギー量を定めれば、シミュレーションにより被覆線の温度を求めることができ、一方 Ozawa の方法を基礎とする温度と除去時間の関係から、十分実用的な除去時間を求めることができる。

3・2 プラズマジェットおよび水素炎による除去

放電する電極間にアルゴンガスを通過させてプラズマ化させ、その周囲にシールドガスを流して熱こう配を高めたものを照射し、短時間かつ微小範囲の除去をねらいとする。構成を図 11 に示す⁽⁷⁾。図 12 はこれによりポリウレタン被覆金線を対象とする被覆除去実験結果であって、被覆除去が可能な上限値と線材が溶断しない下限値間のマージンが極めて小さい。その理由は次のとおりである。短時間で被覆を除去するためには、被覆温度を 500°C 以上にする必要があるであり、一方、線材が溶断しないためには金の融点 (1063°C) 以下であることが必要であってその差は約 600°C であ

るが、対象が微小でありエネルギーの差はわずかである。プラズマジェットのエネルギーを制御するためにはプラズマ電流およびノズルと線材間の距離を変えることになるがわずかなエネルギー差に対応できない。

また、いわゆるウォーターウェルダによる水素の燃焼炎、50 % 水素と 50 % アルゴンの混合ガスの燃焼炎でも、ほぼ同様な結果となる。最高温度が約 3000°C に達するからである。

3・3 エキシマレーザー 単波長かつ高強度のエキシマレーザーによる紫外光が高分子化合物の化学結合を光化学的に切断することが知られ⁽⁸⁾、半導体製造工程におけるリソグラフィ等に用いられている。図 13 はポリウレタン被覆銅線 (芯線径 30 μm , 被覆厚さ 10 μm) に KrF レーザー (波長 248 nm) を照射して被覆を除去している過程であり、500 Hz のパルスで 200

図 8 熱風の温度分布と被覆除去範囲

図 9 熱風温度と被覆部の温度上昇

図 10 熱風による被覆除去プロセス

図 11 プラズマジェットによる被覆除去

ショット (約 0.4 s) で除去しうる。ArF レーザー (波長 193 nm) を用いても同様な結果が得られる。

対象物を加熱しないので近傍への影響が少ない, 除去対象が選択的である等の特徴はあるが, 設置面積が極めて大きい, 除去時間が比較的大である, の理由により, 実用面では熱分解に劣っている。

4. ボール形成時の被覆の溶け上り

短時間 (10 ms 以下) で加熱すること, ボール近傍を金属チャックで把持し放熱させることが, 溶け上り防止に効果的であることは先に報告したとおりであるが⁽⁵⁾, その際, ポリウレタン被覆の損傷が発生する温度は 600°C であるとした。本研究において, 被覆材を温度 600°C で 10 ms 加熱するとその約 30 % が熱分解することを明らかにしている (図 5, 図 10 参照)。この結果より, 先のシミュレーションで被覆損傷発生温度を 600°C であるとしたことの妥当性が確認されたと言える。

5. 被覆極細線接続装置

これまで述べた被覆の除去および溶け上りの防止の検討に基づいて, 被覆細線を対象とする接続装置を開発した。接続方式は, 図 14 に示すようにまず電気トーチによる放電でボールを形成し [同図 (a)], 次いで始端を対象とする第 1 ボンディングを行い [同図 (b)], その後ルーティング前に第 1 および第 2 ボンディングを行う部分の被覆の除去を行って [同図 (c)], ルーティングおよび終端を対象とする第 2 ボンディングを行うものである [同図 (d)]。溶け上りの防止のためにキャピラリ直下に金属チャックを設けると共に短時間放電を行う。被覆の除去には, 芯線に損傷のない熱風方

図 12 被覆除去可能条件

式を採用した。

図 15 は接続部の構成であって, 金属チャックの駆動およびエアヒータの揺動のための機構が付加されている。なお, 熱風による被覆除去の際には, 図では省略しているが被覆の残滓の吸引装置が設けられている。基板への残滓の飛散を防止するためである。

被覆の除去は, 除去長さ 0.5 ± 0.1 , 溶け上りは 0.12~0.20 の結果を得るとともに, 接合強度についても従来と同等の値が得られた。タクトタイムに関しては, 被覆の除去に 100 ms 要すること, チャックおよ

図 13 エキシマレーザーによる被覆除去例

図 14 被覆線のボンディングプロセス

図 15 接続部の構成

びヒータの動作時間が加わり、開発した装置で1.5 s、動作プログラムの改良で0.5 sが見込める状況にある。

6. 結 言

(1) 被覆材の短時間内での熱分解特性を明らかにするために、被覆材の熱重量分析結果より Ozawa の方法により熱分解の反応速度式における活性化エネルギー等の定数を求め、これを発展させて設定温度と除去に要する時間の関係を求めた。さらに、500～800°C の

熱風を角形に成形したノズルから吹き出すことによる被覆除去実験によりその実用性を確認した。

(2) 熱風、プラズマジェット、水素およびエキシマレーザーの被覆除去実験を行い、熱風が実用的に最適であるとの結果を得た。除去に要する時間は約 100 ms である。

(3) 上記に基づいて被覆極細線接続装置を開発した。

文 献

- (1) Ozawa, T., *A New Method of Analyzing Thermogravimetric Data*, *Bull. Chem. Soc. Japan*, **38** (1985), 1881.
- (2) 神戸, 高分子の熱分解と耐熱性, (1974), 286, 培風館.
- (3) Maccallum, A. K., *Thermogravimetric analysis of polymers for assessing thermaldegralation*, *Thermochem. Acta.*, **96-2** (1985), 275.
- (4) Burnham A. K. and Braun, R. L., *Kinetics of poiymer decomposition*, *US DOE No. UCID21293*, (1987).
- (5) 川名, 機論, **56-526**, C (1990), 1576.
- (6) MacFarland, R. C., and Gephard, R. h., *Automatic bonders simplify LSI computer manufacturing*, *Feb.*, (1984), 124, *Electronic Package & Production*.
- (7) 小松, 極小孔径のノズルを用いたプラズマアーク装置, **51** (1988), 79, *Origin*.
- (8) Andrew, J. E., *Direct etching of polymetric material Using a XeCl laser*, *Appl. Phys. Lett.*, **43-8** (1983), 717.